

Deckwerksverformungen aus Wellenbelastung an der Elbe in Hamburg

N. Ohle* und C. Zimmermann**

* Wissenschaftl. Angestellter, FRANZIUS-INSTITUT für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Deutschland, Nienburger Str. 4, 30167 Hannover, Tel. 0511 / 762-4295, Fax: 0511 / 762-3737, E-Mail: Nino.Ohle@fi.uni-hannover.de

** Geschäftsführender Leiter, FRANZIUS-INSTITUT für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, Deutschland, Nienburger Str. 4, 30167 Hannover, Tel. 0511 / 762-5481, Fax: 0511 / 762-4002, E-Mail: zi@fi.uni-hannover.de

1. Deckwerksverformungen an der Elbe

Das Nordufer der Elbe im Bereich Hamburg-Nienstedten zwischen Strom-km 630 und 633 (Abb. 1) ist vor der Hochwassermauer mit Schüttsteinen gegen Erosion durch Strömung und Wellenschlag gesichert.

Das Deckwerk wurde parallel zum Fluss auf sandigem Unterwasser auf einer mineralischen (Filter-) Unterschicht aufgebracht. Im Verlauf von wenigen Jahren bildeten sich Verformungen, d.h. Teile der Deckschicht verlagerten sich in regelmäßigen, wellenartigen Abständen in Richtung Strommitte. Fotoaufnahmen lassen den Eindruck eines Bühnenfeldes aus Schüttsteinen aufkommen, Abb. 2.

Da ein vergleichbarer Schaden an Deckwerken eines Stroms bisher nicht beobachtet bzw. bekannt geworden ist, sollte das Problem näher untersucht werden.

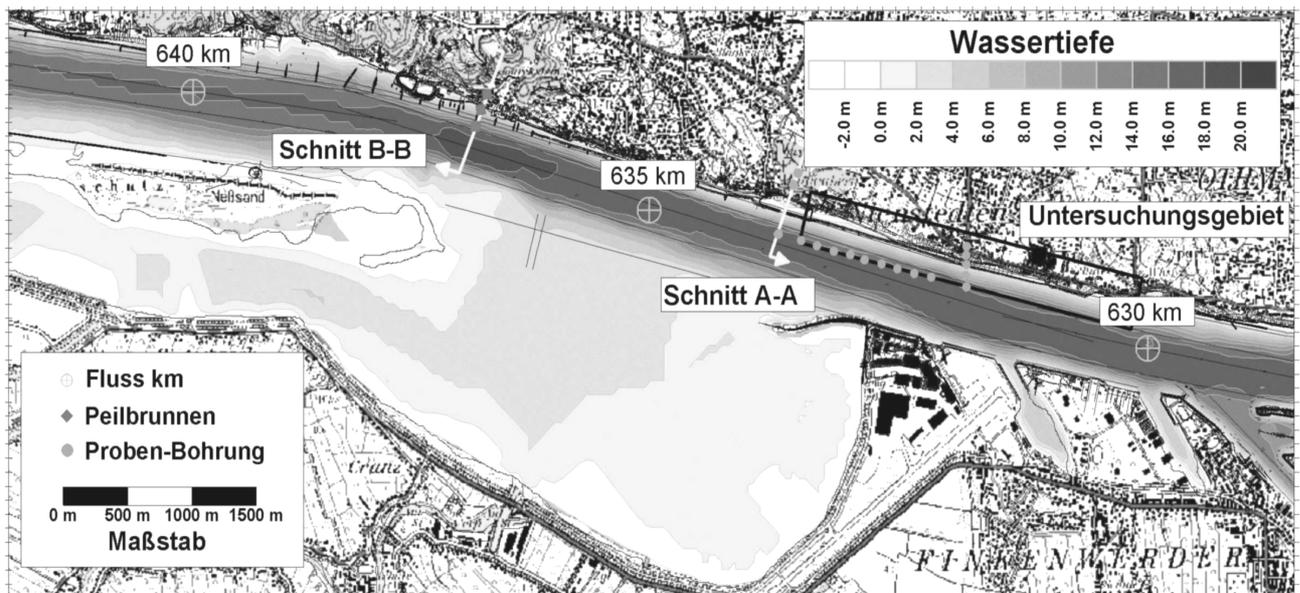


Abb. 1 Untersuchungsstrecke am Nordufer der Elbe Strom-km 630 bis 633

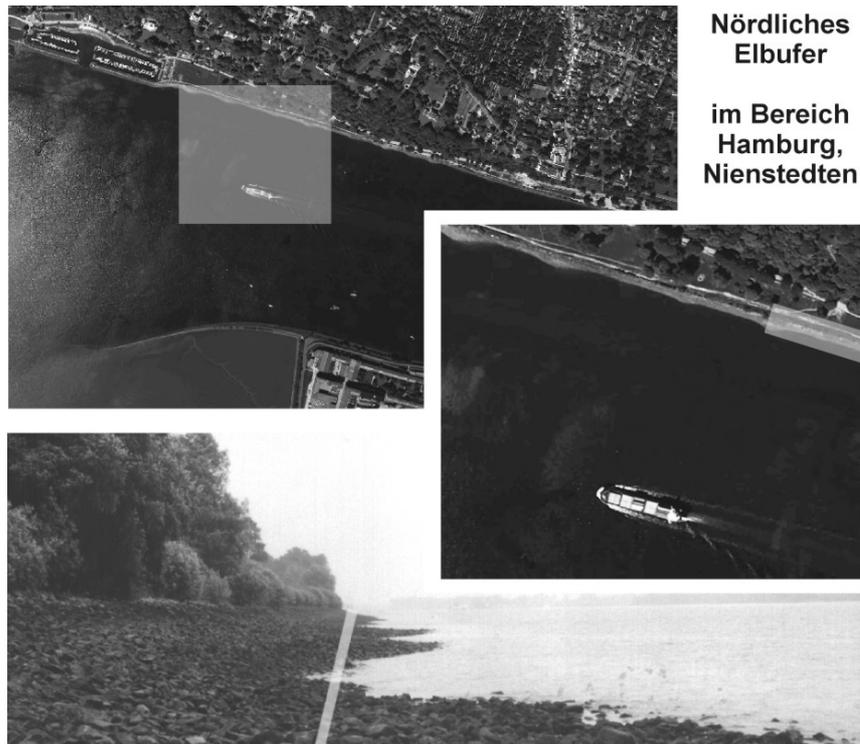


Abb. 2 Verwerfungen des Deckwerks am Nordufer der Elbe [Aufnahme: STROM- UND HAFENBAU, Luftbildaufnahme: D-SAT2 Satellitenatlas für Deutschland, SCOUT-SYSTEMS]

2. Aufbau des Uferdeckwerks

Das Nordufer der Elbe bei Nienstedten zwischen Strom-km 630 bis 633 (Untere Elbe Blatt 10) wurde von 1952 bis 1956 in seiner heutigen Form ausgebaut. Hierzu wurde auf dem Urgelände ein Wall mit Trümmerschutt angelegt. Seine Außenböschung hatte eine Neigung von 1:3, die Binnenböschung eine Neigung von 1:2 (Abb. 3). Die Krone des Walls wurde mit Kaimauerabdeckplatten abgedeckt, welche von der ehemaligen schon vor dem Krieg gebauten und im Krieg teilweise zerstörten Kaimauer stammten. Das Gelände bis zur ehemaligen Kaimauer wurde mit Sand aufgefüllt. Zur Wasserseite hin schloss sich an die Kaimauerabdeckplatten ein Kaimauerbegrenzungsband, welches ebenfalls von der alten Kaimauer genommen wurde. Die Außenböschung des Trümmerwalls wurden mit Natursteinen gesichert.

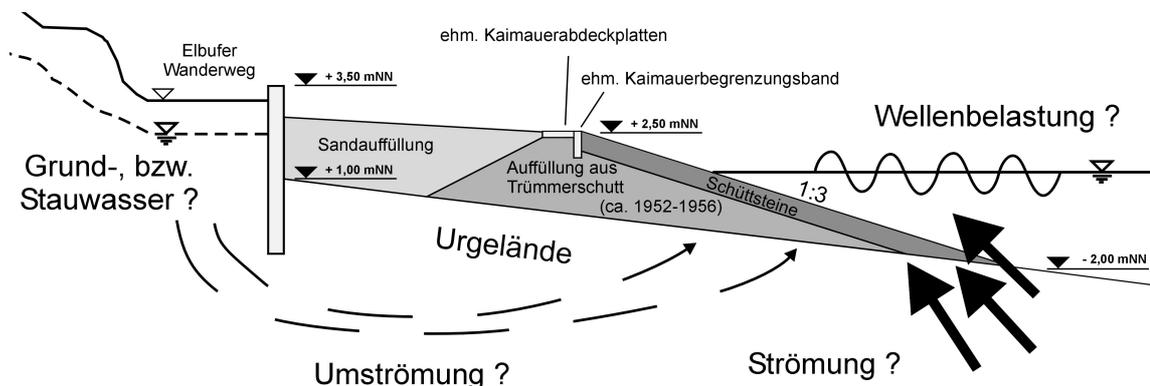


Abb. 3 Querschnitt des Uferdeckwerks im Untersuchungsbereich

Das Deckwerk der Uferböschung im Bereich Nienstedten wurde im Januar 1996 von STROM- UND HAFENBAU instandgesetzt. Hierzu wurden Naturschüttsteine der Wasserbaustein-Klasse II verwendet.

3. Bodenmechanische Strukturen

Der Einbau eines Deckwerkes an Uferböschungen erfolgt bei erosionsgefährdeten Lockergesteinen, wie Sand-, Kies-, Schluff- und Tonböden. Bei Strömungs- und Wellenbelastungen z.B. durch Schiffe wird eine durchlässige oder dichte konstruktive Sicherung (Deckwerk) gegen Erosion und Böschungsbruch wie auch im Untersuchungsgebiet aufgebracht.

Der Untergrund im Untersuchungsgebiet wurde 1971 durch 18 gestörte Proben (Bohrungen) erkundet. Die Lage und Mächtigkeit der einzelnen Schichten kann hierbei nur für die Probeentnahmestellen exakt festgestellt werden. Aus der Lage der einzelnen Schichten des Schnittes A-A (Abb. 4, Lage Abb. 1) wurde auf die weiteren geologischen Strukturen geschlossen.

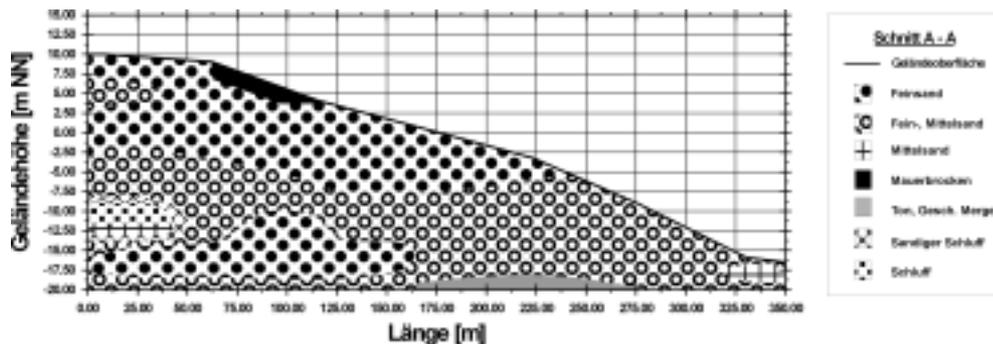


Abb. 4 Geologischer Querschnitt im Bereich des Untersuchungsgebiets (Schnitt A-A, Lage Abb. 1)

Es ist erkennbar, dass offenbar im Untersuchungsbereich konsolidierte und nicht kompressible Schichten vorliegen, die zu Setzungen und damit zu Deckwerksverformungen führen könnten. Auch ist kein Zusammenhang zwischen Verformungen der Sohle infolge von Propellerstrahlbelastung und Rippelbildung und den Deckwerksverformungen erkennbar, da eine Erosion der Fahrrinnensohle in diesem Bereich aufgrund der erosionsfesten Böden nur schwer möglich ist.

4. Grund- und Stauwasser

Durch Grund-, Stau- und Sickerwasserströmungen kann es zu einer Belastung des Deckwerkes von innen kommen. Diese indirekten Kraftwirkungen auf ein Deckwerk werden von hydrostatischen Druckänderungen verursacht, die bei einem Absink unterhalb des Wasserspiegels auftreten können. Ein Wasserspiegelabsenk bewirkt im gesamten abgesenktem Bereich des Gewässerbettes Porenwasserüberdrücke im Untergrund, deren Größe von der Absinkgeschwindigkeit, vom Absinkmaß und von der Durchlässigkeit des Bodens abhängig ist.

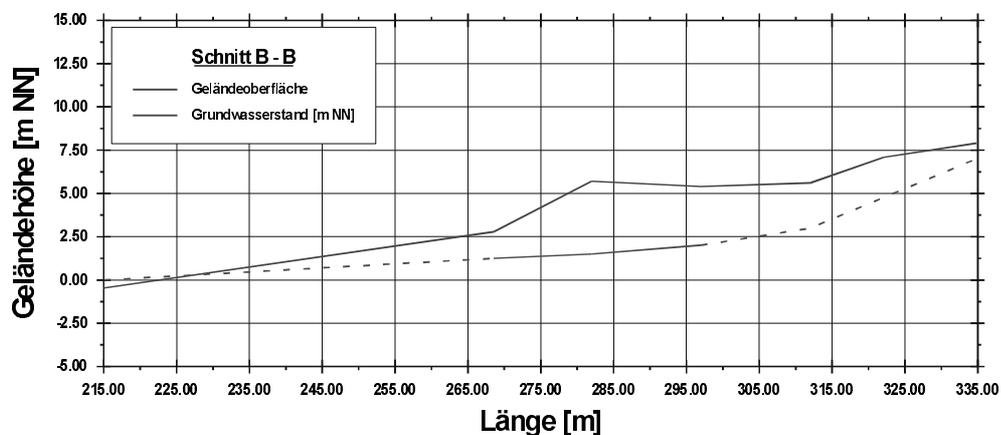


Abb. 5 Profil des Grundwasserspiegels quer zum Ufer (Schnitt B-B, Lage Abb. 1)
[Jahresmittelwert 1996 ermittelt von den HAMBURGER WASSERWERKEN GMBH]

Die durch den Absink bedingten Porenwasserüberdrücke haben zur Bodenoberfläche gerichtete Porenwasserströmungen zur Folge, die bei Überschreiten des Grenzspannungszustandes an Unterwasserböschungen zu Rutschungen führen können. Der Grundwasserspiegel ist in dem Bereich des Wasserwerks Boursberg mit Hilfe von insgesamt 4 Peilbrunnen erfasst.

Im Querschnitt des Grundwasserprofils (Abb. 5, Lage Abb. 1) ist zu erkennen, dass der Grundwasserspiegel im Bereich des Böschungsfußes austritt. Dies liegt selbst bei Tideniedrigwasser unter Wasser. Es ist auch erkennbar, dass der Grundwasserspiegel im Deckwerksbereich rund 5 m unter der Geländeoberfläche liegt, d.h. in weiten Bereichen keinen Einfluss auf das Deckwerk hat.

5. Bathymetrie der Elbe

Die Systemgeometrie des Uferdeckwerkes mit seiner umgebenden Topographie und Bathymetrie haben vor allem Bedeutung bei Seegangsbelastungen bzw. die durch Umformungsprozesse veränderten Wind- und Schiffswellen am Ufer. Die Bathymetrie hat jedoch nur Einfluss auf die Wellen, wenn diese in diesem Bereich schon Grundberührung haben, d.h. wenn hinsichtlich des Seeganges Flachwasserbedingungen vorherrschen. Im Flachwasser verändert die Bathymetrie die Seegangausbildung durch Refraktionsprozesse. Zur Bemessung des Deckwerkes und zur Ermittlung eventueller Schadenspotentiale und Veränderungen eines Deckwerkes wird nach VAN DER MEER (1993) die erosionsgefährdete bzw. die schon in Umformung befindliche normierte Fläche des Deckwerkes benötigt. Diese kann z.B. mit Hilfe von Peilungen aufgemessen und quantifiziert werden. Um Veränderungen des Deckwerkes und seiner umgebenden Bathymetrie quantifizieren zu können, wurden Peilungen aus dem Jahr 1998 von der Referenzpeilung im Jahr 1996 abgezogen (Abb. 6). Auflandungen bzw. Erhöhungen im Gelände in der 1998'er Peilung sind gegenüber der Referenzpeilung hellgrau dargestellt, während Erosionen und Abtrag von Sedimenten oder Deckwerkssteinen dunkelgrau dargestellt sind.

Es ist deutlich erkennbar, dass sich im Bereich des Strom-km 631,8 eine Ausbuchtung aus dem ehemals geraden Deckwerk gebildet hat. Hier haben Verformungen mit bis zu 0,6 m Höhe (lotrecht zum freien Wasserspiegel) stattgefunden. Die meisten Verformungen die in den zwei Jahren zwischen den Peilungen stattgefunden haben sind im westlichen Bereich des Peilabschnittes erkennbar. Hier haben Veränderungen mit bis zu 0,4 m Höhenunterschied stattgefunden. Im östlichen Bereich sind weniger Veränderungen erkennbar, die sich in ihrer Größe aber kaum verändert haben. Zwischen den Peilungen im Januar 1998 und März 1998 sind im Vergleich zur Referenzpeilung 1996 kaum Unterschiede erkennbar.



Abb. 6 Differenz der Flächenpeilungen im Untersuchungsgebiet [hier: zwischen der Peilung im Januar 1998 und im Januar 1996]

6. Belastungen auf das Uferdeckwerk

Direkte hydraulische Kraftwirkungen auf eine ungebundene Deckschicht werden von Strömungsvorgängen erzeugt, die mit einem schnellen Absink verbunden sind. Dies sind vor allem:

- uferparallele, schiffsfahrtbedingte Rückströmungen
- böschungsabwärts gerichtete Durch- und Überströmungen der Steine bei schiffsfahrtbedingtem oder windwellenbedingtem schnellem Absink

Beim Leerlaufen der Deckschicht tritt die aus dem Steingerüst ausfließende Wassermenge infolge des Strömungswiderstandes der Steine je nach Absinkgeschwindigkeit und Hohlraumgröße des Steingerüsts zeitlich verzögert mit einer turbulenten Strömung aus, wobei die Strömungsgeschwindigkeit jeweils in Höhe des absinkenden Wasserspiegels am größten sind.

Die Strömung ist nahezu horizontal aus der Deckschichtoberfläche heraus gerichtet (Abb. 7). Die unter Auftrieb befindlichen Steine in Höhe des abgesenkten Wasserspiegels werden relativ am stärksten belastet.

Der Absink ruft turbulente Strömungen hervor und kann daher im Hinblick auf die Erosionsfestigkeit von ungebundenen Deckschichten wie diese behandelt werden.

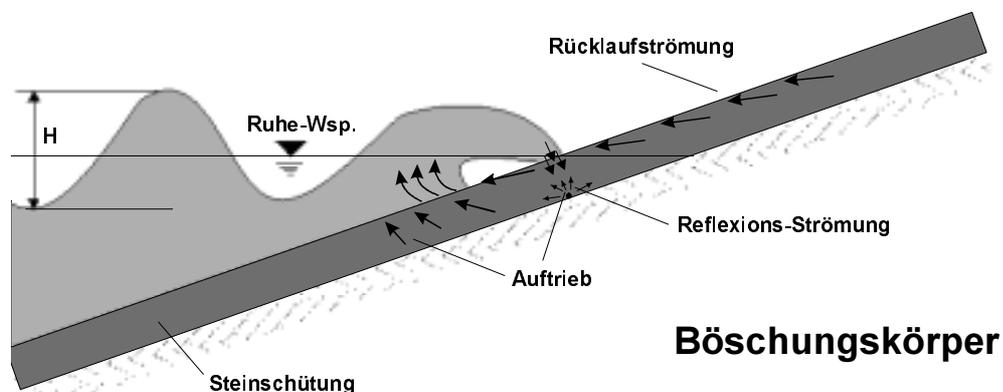


Abb. 7 Strömungen in einer Steinschüttung an Böschungen bei schnellem Wasserspiegelabsink [BAW, 1996]

Neben dem Absink aus Wind- und Schiffswellen und der hierdurch verursachten Strömungen können Erosionen auch durch direkte Einwirkungen von Strömungen auf das Deckwerk verursacht werden.

Die Strömungen sind maßgeblich für die Art und Form der Umlagerungen im Deckwerk verantwortlich. So kann es durch Strömungen zu Längstransport und oder auch Quertransport von schon gelockerten und in Schwebelage gebrachten Deckwerksteinen kommen. Warum dies zu welligen und periodisch verformten Deckwerksprofilen führt, wie sie im Untersuchungsgebiet vorkommen, ist bisher nicht bekannt.

7. Strömungen im Bereich des Deckwerks

Für den untersuchten Abschnitt des Uferdeckwerks im Bereich des Elbe Strom-km 630 bis 633 sind Strömungssimulationen durch die BAW (1996) durchgeführt worden. Sie zeigen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des untersuchten Deckwerks bei durchschnittlich 0,3 m/s während der Ebbe-Phase liegen. Zur Flut-Phase betragen die durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten über dem Deckwerk etwa 0,4 m/s bei mittleren Tideverhältnissen.

Die Strömungen treten weitgehend uferparallel auf. Zur Flut-Phase bewirkt die Spundwand am Mühlenberger Loch offenbar eine Umlenkung der Strömung und damit eine schräge Anströmung des Deckwerks im westlichen Bereich des Untersuchungsgebiets (schwarze Pfeile in Abb. 8). Dies ist bei einer Gitterauflösung von 50 m x 50 m im Modell jedoch nicht eindeutig. Um für diesen Bereich eine genauere Aussage treffen zu können, müsste ein Detailmodell für diesen Bereich aufgebaut werden.

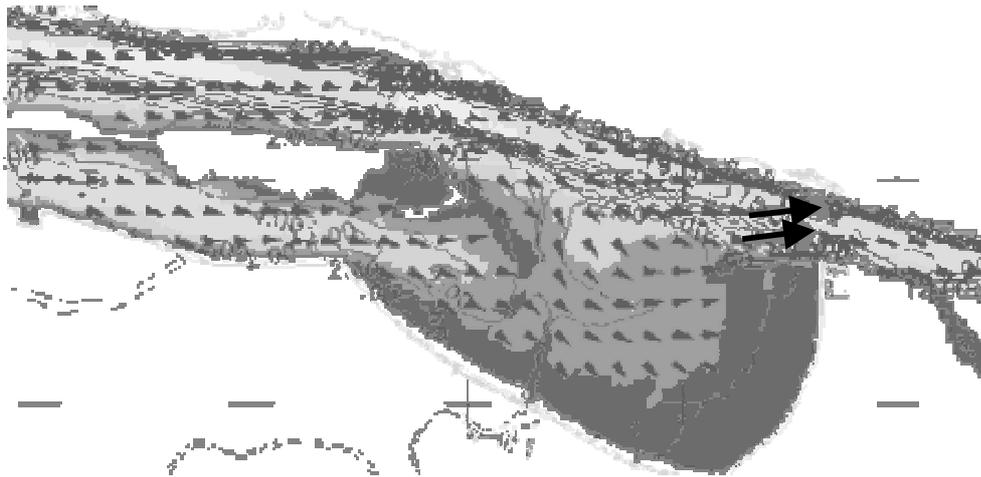


Abb. 8 Simulierte Strömungsgeschwindigkeiten während der Flut-Phase mit Andeutungen der Strömungsbelastung auf das Deckwerk (BAW, 1996)

Die simulierten Strömungsgeschwindigkeiten stellen keine direkte Gefährdung des Uferdeckwerkes dar. Es können sich keine einzelnen Steine des Deckwerks hierdurch in Bewegung versetzen. Für einen durchschnittlichen Steindurchmesser $D_{N50} = 0,25$ m des Deckwerks (WASSERBAUSTEINKLASSE II) liegt die kritische Erosionsgeschwindigkeit nach SHIELDS (1936) bei $v_{krit} = 2,5$ m/s. Die uferparallele Strömung kann jedoch durch andere Belastungen gelockerte oder sich in Schwebelage befindende Deckwerkssteine transportieren und an anderer Stelle ablagern. Hierbei könnte besonders die schräge Anströmung im westlichen Bereich (schwarze Pfeile in Abb. 8) des untersuchten Uferdeckwerkes zu welligen und periodischen Verformungen des Deckwerks führen, wie sie im Untersuchungsgebiet vorkommen.

8. Schiffsinduzierte Wasserspiegelauslenkungen

Das Schiff muss bei seiner Fahrt, das sich „im Weg befindliche“ Wasser vor dem Bug verdrängen. Dabei bildet sich vor dem Bug ein „Bugstau“ aus und seitlich des Schiffskörpers eine Absenkung des Wasserspiegels (Druckminimum), so dass das Wasser seitlich des Schiffes nach achtern beschleunigt wird, am Heck wieder zusammenströmt und dort abgebremst wird („Heckstau“). Der strömungsmechanische Prozess wird überlagert durch das Ansaugen und Abstrahlen des Schraubenwassers. Je schneller das Schiff fährt, desto größer ist die Wassermenge je Sekunde, die verdrängt und seitlich am Schiff beschleunigt werden muss. Der erforderliche Energieeintrag über die Schiffsschraube steigt dabei überproportional an. Entsprechend steigt mit zunehmender Schiffsgeschwindigkeit die entstehende Primärwellenhöhe an. In Abb. 9 ist das Wellensystem an einem Schiff dargestellt und definiert.

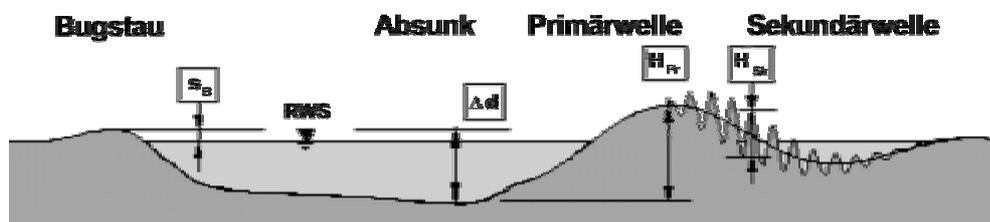


Abb. 9 Schematischer Schnitt durch ein schiffserzeugtes Wellensystem (überhöht) [BAW, 1996]

Um die schiffinduzierten Wellen und den durch sie hervorgerufenen schnellen Wasserspiegelabsenk zu ermitteln, wurden an drei Messquerschnitten an der Elbe vom 27. bis 29. Juli 1999 Naturmessungen durchgeführt. In diesem Zeitraum herrschten gute Wetterbedingungen und fast Windstille, d.h. keine windbedingten Wellen. Die gemessenen Wasserspiegelveränderungen hatten ihre Ursache in Schwall und Absenk des Wasserstands, der durch Schiffe verursacht wurde.

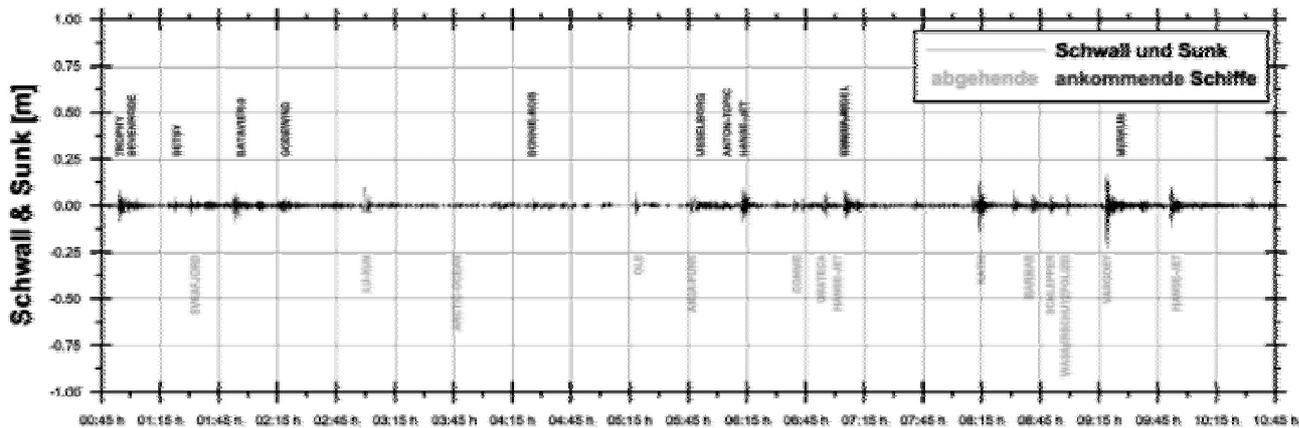


Abb. 10 Naturmessungen vom 27. Juli 1999 am Messquerschnitt 1

Der Tagesmaximalwert der in Abb. 10 beispielhaft dargestellten Messung vom 27. Juli 1999 wurde vom Schiff ALBEMARIE ISLAND verursacht. Sie erzeugte einen Absenk Δd von 0,53 m, die Höhe der Primärwelle betrug 0,62 m die höchsten Sekundärwellen waren 0,35 m hoch. Die Primär- und Sekundärwellensysteme weisen Perioden von 5 bis 10 Sekunden auf. Insgesamt ist aber die Anzahl der Fahrten von Schiffen, die Deckwerksverformungen verursachen können, im Bereich des Untersuchungsgebietes mit rund 5000 Einzelfahrten nach einer Studie des FRANZIUS-INSTITUTS (1995) zur Flottenstruktur und Schiffgeschwindigkeiten im Rahmen der Untersuchungen der Schiffswellenbelastung infolge Fahrrinnenanpassung der Elbe, eher als gering anzusehen. In Kombination mit Windwellen können jedoch maßgebende und kritische Belastungen entstehen, die solche Verformungen verursachen.

9. Belastung durch schiffsinduzierte Wellen im physikalischen Modell

Da Verformungen an Deckwerken eines Stromes wie in Hamburg bisher noch nicht zu beobachten waren, wurden einige qualitative physikalische Untersuchungen in der Schiffsrinne des FRANZIUS-INSTITUTS durchgeführt.

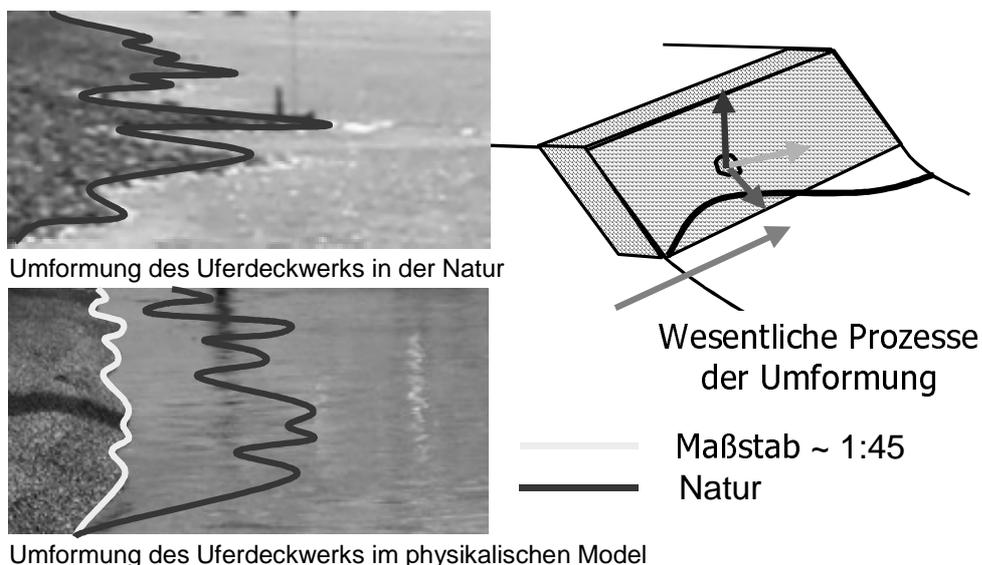


Abb. 11 Umformungen des Uferdeckwerks in der Natur und im physikalischen Modell nach mehr als 1000 Schiffspassagen

Die Untersuchungen wurden in einem Modell mit ebener beweglicher Sohle im Maßstab 1:45 durchgeführt. Hierbei wurde ein charakteristischer Aufbau gewählt, wie er im westlichen Bereich am Nordufer der Elbe

vorkommt. Zur Vorbeifahrt im Model wurde ein maßstäbliches Containerschiff eingesetzt, welches mit der Schleppvorrichtung der Schiffsrinne bewegt wurde. Die Schleppvorrichtung ermöglicht eine hohe Beschleunigung und Geschwindigkeit, sowie die Trimmung des Schiffes. Abb. 11 zeigt die Ergebnisse der Deckwerksumformung nach der Vorbeifahrt von mehr als 1000 Schiffen im physikalischen Model. Die dunkle Linie zeigt jeweils die umgerechneten Verformungen im Naturmaßstab, während die helle Linie die Verformung im Modellmaßstab von 1:45 angibt.

10. Windinduzierte Wellen

Für den Bereich des Uferdeckwerkes wurden die möglichen Seegangsverhältnisse mit dem numerischen Seegangmodell SWAN (HOLTHUIJSEN, L.H. und BOOIJ, N., 1987), für unterschiedliche Tidewasserstände, Strömungen und Windsituationen berechnet. Der Seegang wird in diesem Bereich zunächst durch örtliche Windfelder angefacht. Dabei ist der Energieeintrag und damit auch die entstehende Wellenhöhe von der Windgeschwindigkeit und insbesondere der Windwirklänge (Streichlänge) abhängig. Im Untersuchungsgebiet können Westwinde Wellen bis ca. 1,0 m bewirken, da das Mühlenberger Loch hier eine relativ große Windstreichlänge bietet. Vor allem die westlichen Teile des Uferdeckwerkes sind diesen relativ hohen Wellen bei Westwinden ausgesetzt, während an den östlichen Deckwerken des Untersuchungsgebietes geringere Wellenhöhen auftreten dürften. Für diesen Bereich herrschen für alle Windlagen nur kurze Windwirklängen. Abb. 12 zeigt die für die numerische Seegangssimulation notwendige Bathymetrie des Untersuchungsgebietes und das Ergebnis einer Seegangsberechnung. Die Gitterauflösung betrug 2,5 m in x- und y-Richtung.

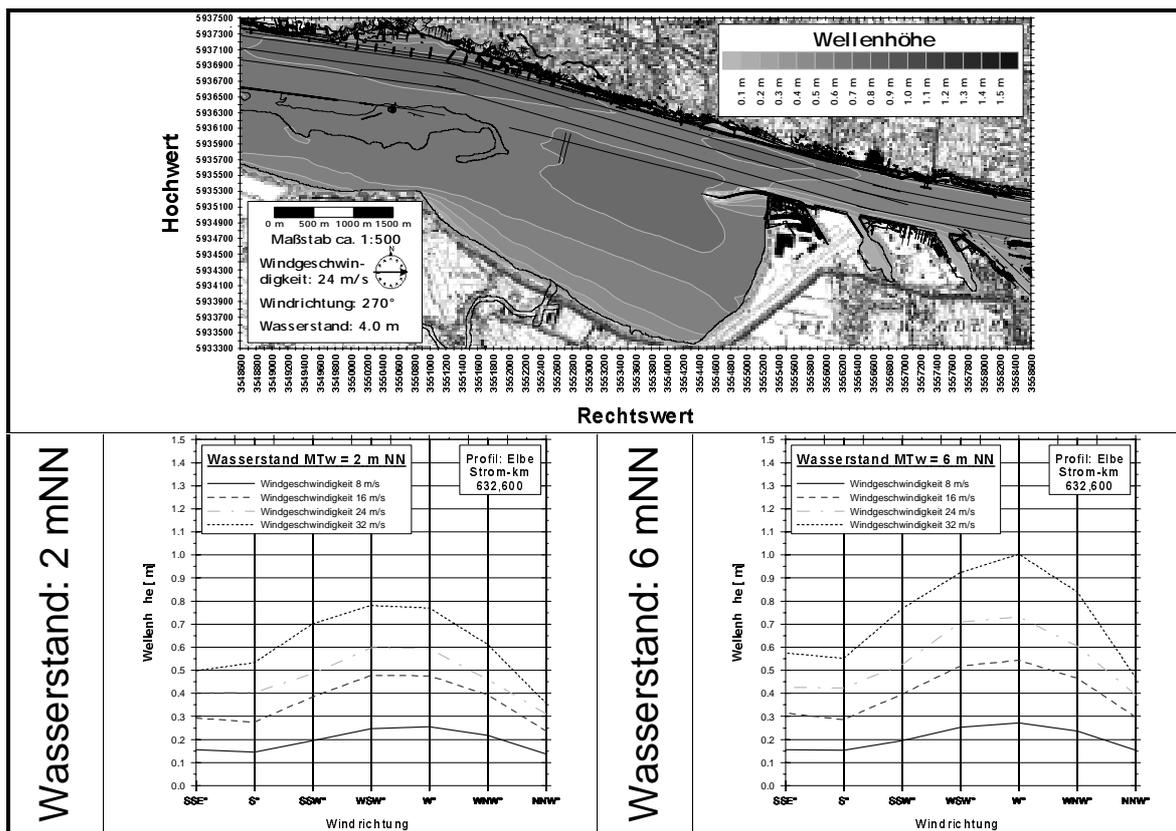


Abb. 12 Simulierte Wellenhöhen für unterschiedliche Wasserstände, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen im gesamten Untersuchungsgebiet und als Schnitt am Elbe Strom-km 632,6

Die simulierten Wellenhöhen sind für unterschiedliche Wasserstände, Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen im gesamten Untersuchungsgebiet und als Schnitt am Elbe Strom-km 632,6 in Abb. 12 dargestellt. Aus den Simulationsergebnissen ist erkennbar, dass es durch Windwellen zu erheblich höheren Be-

lastungen des Deckwerks, verglichen mit Schiffswellen kommt. Entscheidend ist hier die höhere Belastungsanzahl von signifikanten Belastungswellen. So treten bei jedem Sturmflutereignis alle 2 bis 3 Sekunden Wellen mit Höhen von 0,5 m bis 1 m auf, während gleichwertige Schiffswellen nur bei wenigen Ereignissen im Jahr liegen. Die sehr hohen Belastungen am Deckwerk treten jedoch nur bei Westwindlagen mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 16 m/s auf.

11. Erste Schlussfolgerungen

Die hauptsächlichen Belastungen treten nach der vorliegenden Untersuchung in Folge von Wellen aus Wind und Schifffahrt und ihrer Kombination auf. Hier wurde aufgezeigt, dass die Schiffsgeschwindigkeit neben dem Abstand zum Ufer die wichtigste und einzig aktiv beeinflussbare Steuergröße für die Höhe der Schiffswellen darstellt.

Die Gesamtheit der Belastungen und auch die Belastungsgrößen mit ihren langperiodischen Wellen aus der Schifffahrt erscheinen aber allein nicht signifikant, um die Deckwerksstabilität nachhaltig zu beeinträchtigen.

Hingegen haben die Untersuchungen gezeigt, dass die Belastungen aus Windwellen gerade bei Sturmfluten wesentlich höher liegen können. Ob diese Belastungen alleine ausreichen, eine Deckwerksverformung hervorzurufen, muss im Weiteren untersucht werden.

12. Literatur

- BAW (1996): "Gutachten zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt - Zusammenfassendes Gutachten Hydromechanik", Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste, Hamburg
- Franzius-Institut (1995): "Ausbaubedingte Änderungen der schiffserzeugten Belastungen in der Unter- und Außenelbe", Auftraggeber: BAW Küste, Hannover
- Holthuijsen, L.H. und Booij, N. (1987): "A Grid Model for Shallow Water Waves", Proceedings of the 20th ICCE, Taiwan, 1987
- Hudson, R.Y. (1959). "Laboratory Investigations of Rubble-Mound Breakwaters", Journal Waterways and Harbors, ASCE, Vol. 96, No. WW2
- Mai, S., Ohle, N., Daemrich, K.-F. (1999): "Numerical Simulations of Wave Propagation compared to Physical Modeling", Proceedings of the HYDRALAB-Workshop, Hannover, Germany
- Pilarczyk, K.W. (1988): "Dikes and Revetments – Design, maintenance and safety assessment", A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield
- Shields, A. (1936): "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung", Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasser-, Erd- und Schiffbau, Heft 26
- van der Meer, J.W. (1988): "Deterministic and probabilistic design of breakwater armor", Journal Waterways and Harbors, ASCE, Vol. 114
- van der Meer, J.W. (1993): "Conceptual design of rubble mound during model test", Delft hydraulics, Delft University of Technology, Publications No. 483, Delft